

核能
簡訊
雙月刊
中華民國九十六年六月號
No. 106
全球用過核子燃料再處理現況
賡續鴻基再造新猷　專訪原能會蘇獻章主委
德國最終處置場址終於放行
鈽熱中子是目前最有效用的再處理法
輻射醫療應用的研發近況

核能簡訊

JUNE

中華民國九十六年六月號



CONTENTS

封面：德國下薩克森州州政府

出版單位　中華民國核能學會
財團法人核能資訊中心
地　　址　新竹市光復路二段一○一號
研發大樓208室
電　　話　(03) 5711808
傳　　真　(03) 5725461
網　　址　http://www.nicenter.org.tw
E－mail　nic@nicenter.twmail.net
發 行 人　朱鐵吉
編輯委員　李四海、徐懷瓊、翁寶山、黃文盛、萬永亮、劉仁賢、潘欽、蔡顯修、謝牧謙、鍾堅、顏上惠、蕭金益（依筆畫順序）
主　　編　朱鐵吉
顧　　問　喻冀平
文　　編　鍾玉娟、翁明琪、陳婉玉
美　　編　陳慧欣
編 印 者　信誠廣告事業有限公司
地　　址　台北市興安街100號3樓之5

■ 行政院新聞局出版事業登記證・局版臺誌字第 851 號

編｜者｜的｜話

此番內閣改組，在眾人一片驚呼聲中，原子能委員會主任委員一職由蘇獻章副主委接任，本刊隨即在第一時間進行專訪，請蘇主委暢談接任時的心情轉折與未來的工作重點。外界視他為黑馬，而他自己也這麼認為。但是蘇主委憑著完整且專業的學經歷背景，以及5年多的原能會高階主管實務經驗，蘇主委的出線雖然令人意外，卻是感到安心的不二人選。

蘇主委強調將在原能會既有的良好根基之上，繼續推動核能安全管制、輻射安全維護、放射性廢棄物管理、全國環境輻射偵測與原子能民生運用的研發推廣，進而突顯出核能有助於二氧化碳減量與經濟發展的優勢。

資源回收，已經是近來環保意識抬頭之下的重要觀念，用過核子燃料中有高達97%是可回收再運用於核能發電的物質，法國、日本、俄羅斯等國都已經將這些可用物質進行再處理，製造成新的燃料。多年來，我國跟隨美國的作法，將用過核子燃料視為廢棄物，暫時貯存，等待最後的處置。

但是在能源極度匱乏的我國，國際能源價格一再飆升，來源也受到百般限制，能源環境可說是極度艱困。用過核子燃料再處理，無異是一道曙光，不僅可將高放射性廢棄物做更有效能的再利用，充分發揮核子燃料低成本、高經濟的特性，又可減少廢棄物的數量，對環境保護有極大助益，現在連美國也亟思再處理的的可行性。希望我國能搭上「全球核能夥伴計畫」中再處理的便車，創造準自產能源，同時也突破用過核子燃料乾式中期貯存的僵局。

賡續鴻基　再造新猷



◆ 編輯室



蘇主委賢伉儷快樂出遊

5月17日中午的一通電話，將原子能委員會副主委蘇獻章扶正為新任的主任委員，為原能會開啓嶄新的一頁，也讓前一天還隨同前主委歐陽敏盛赴各單位道別的蘇獻章大為驚訝。

「真的就如報載，我是一匹黑馬，連自己都感到很意外。」蘇主委直率的笑說。

令人安心的「黑馬」

蘇主委1945年生，高雄縣永安鄉人，是清華大學核工系第一屆畢業生（1968），清華大學原子科學所畢業（1970）之後即進入核能研究所任職，此期間再赴美國喬治亞理工學院取得核子工程博士學位（1979）。蘇主委不僅是科班出身，一路走來，都與原子能研究工作息息相關，專業學養淵博深厚。

每個機構在主管變動之際，內部人員不免會產生擔憂疑慮，對新任主管的一切都需要經過一番摸索與適應。

蘇主委過去曾擔任原能會輻射防護處處長2年、政務副主委3年，與原能會全體同仁相處這麼長的時間，行事作風都早已為大家所熟悉；而蘇主委對原能會大小業務更是瞭若指掌，應會將彼此適應的衝擊降至最低。

核能安全穩定的推手

蘇主委表示，在前任主委歐陽敏盛7年來的努力下，已經為原能會各項業務建立完善的系統，打下良好的基礎。蘇主委將再推動

數項特定工作，以加強原能會的核安管制功能。

原能會是原子能的主管機關，負責原子能科技政策的擬訂與推展、核子設施營運安全的管制、輻射安全的維護、放射性廢棄物處理、貯存及最終處置的管理、全國環境輻射的監測以及原子能科技民生應用的研發與推廣等業務。



2006年11月，蘇主委與美國核能管制委員會（NRC）主席Klein博士合影

目前蘇主委將繼續推動的重點工作包括：核能電廠執照更新、功率提昇與核四廠終期安全分析報告的審查、輻射業務簡政便民的通關E化能順利上線、落實緊急應變的整備作業、監督與協助台電公司加速低放射性廢棄物最終處置場址的選定以及核一廠乾式中期貯存設施的建立、強化國際（美國、日本）合作效能，並配合國家政策積極推動再生能源與新能源的研發。

回顧西元2000年時，國際間仍瀰漫著一股「非核」熱潮，尤其是歐洲國家（如：德國、義大利、瑞典等）紛紛提出廢核宣言，我國在此氛圍及民情輿論之下，也擬訂出非核家園的政策方針。然而近年來，隨著油價不斷高漲及京都議定書的生效，使核能發電再度成為許多國家討論的議題。在考量國內的政經情勢之後，蘇主委表示將遵守2005年第2次全國能源會議的結論，務使核一、二、三廠穩定安全的運轉，並監督核四廠能在最高品質要求下如期完工，以提供民眾安全、可靠的電力資源，充分發揮核能安全與經濟的效能，以滿足國家未來永續發展的需求。

要讓民眾安心、放心

原子能委員會與民眾有關的業務，蘇主委堅持以「簡政便民、服務至上」為理念，以核子設施的安全讓民眾安心、放心為首要目標。蘇主委強調，外界覺得原能會近年來表現亮麗，核安工作沒有出什麼問題，其原因有二：1.在非核家園的政策下，原能會每個人都兢兢業業，不允許出任何差錯。2.在前主委歐陽敏盛主政之下，一切公開、透明，用人唯才，同仁自然竭盡所能。

「吃苦當作吃補，危機就是轉機。」



蘇主委有感而發，想起2001年調到輻射防護處服務時遇到射源遺失的事件，讓他和同仁忙得人仰馬翻。為了解決問題，還要與時間賽跑，當時的蘇處長在短短一年之內完成了「游離輻射防護法」與所有相關子法，並建置完成「輻防資訊管制系統」，將各類證照資訊化。其拼勁令人折服，及時補強輻射防護的管制漏洞，也將可能衍生的後遺症消弭於無形。

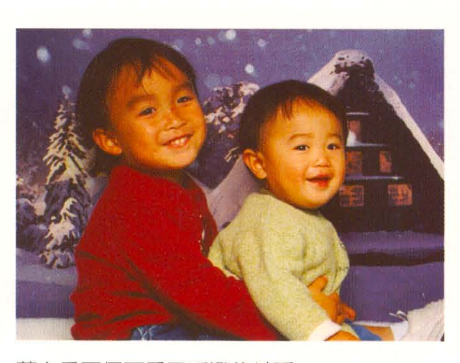
胸有成竹再出發

蘇主委的辦公室裡放著一台腳踏車，他偶從新店家中騎車上下班，崇尚儉樸，也運動健身，「我可是一個鄉下小孩。」爽朗的笑容、紅潤的氣色，看不出他有60多歲的年紀。

蘇主委生長在高雄縣永安鄉的一個偏僻小漁村，在空襲的陰影之下誕生，他的出生成了家族的新希望，雖然當時的生活環境非常困苦，他仍備受關愛與呵護。從小到大的學業成績與工作表現，蘇主委一直都是家族的驕傲。

大概很少人知道，蘇主委在大學時代就曾到原能會工讀，當時做的是翻譯美國核能宣導影片的配音與字幕，沒想到30幾年後的現在會接任原能會主委。本已打算隨著前主委歐陽敏盛共進退，到新埔當個農夫，輕鬆愉快度日。他形容現在自己的心境就如同胡適所說的一句話：「過河的卒子，只能往前衝。」蘇主委坦言，人生有很多的意外，戲碼並非自己能導演，他從未曾主動求官、求職，對每一個新的職務只知道自己必須全力以赴。也因此時時心懷感激，事事樂觀看待，處處隨遇而安。

對於新職，蘇主委不覺得是重擔，因為「原能會已經是一支很強的專業團隊，還有清華大學與核能研究所的奧援，我有自信可以勝任。」這份從容與穩定的力量，相信不只是原能會之福，也是民眾之福。



蘇主委兩個可愛又活潑的外孫



蘇主委與公子，父子倆都帥

全球用過核子燃料再處理現況

◆ 編輯室

根據美國能源部2007年4月的統計，現今世界石油蘊藏量為13,174億桶，每日消耗量為8,100萬桶，以這樣的消耗速度計算，石油存量僅可供全世界使用40餘年。[1] 而已知開採成本在130美元以下的鈾礦礦藏，約有474萬噸，可供全世界使用數百年。[2,3]核能電廠使用鈾發電，鈾的體積小、發電成本低廉，與利用石油發電相較之下，產生極少量的二氧化碳，為全球日趨暖化下的最佳發電選擇。

核能電廠使用氧化鈾燃料發電，燃料為陶瓷小丸型態，放在金屬燃料棒內。這些燃料棒組合成束，稱做燃料組件。核能電廠每隔一年半到兩年會停機檢修，移除及替換已經釋出極大能量的最舊的燃料組件。一個用過燃料組件中，97%為可再回收的物質，若以高放射性廢棄物處置，甚為可惜。但若採再處理，可將用過核子燃料中的鈾及鈽回收，避免浪費寶貴資源。用過核子燃料中--96%為鈾(鈾235占不到1%)、鈽可達1%--能再循環成為新燃料，節省約30%另外所需的天然鈾原料。[4]

每年全世界營運中、總數435座的核子反應器，產生約1萬噸的用過核子燃料。

在世界民用核能電廠52年的營運史上，產生約276,000餘噸的用過核子燃料。其中大約有1/3採再處理，剩下的19萬噸用過核子燃料大多放在電廠內的水池貯存，但乾式貯存量也日益增加。圖

表1. 世界石油蘊藏量

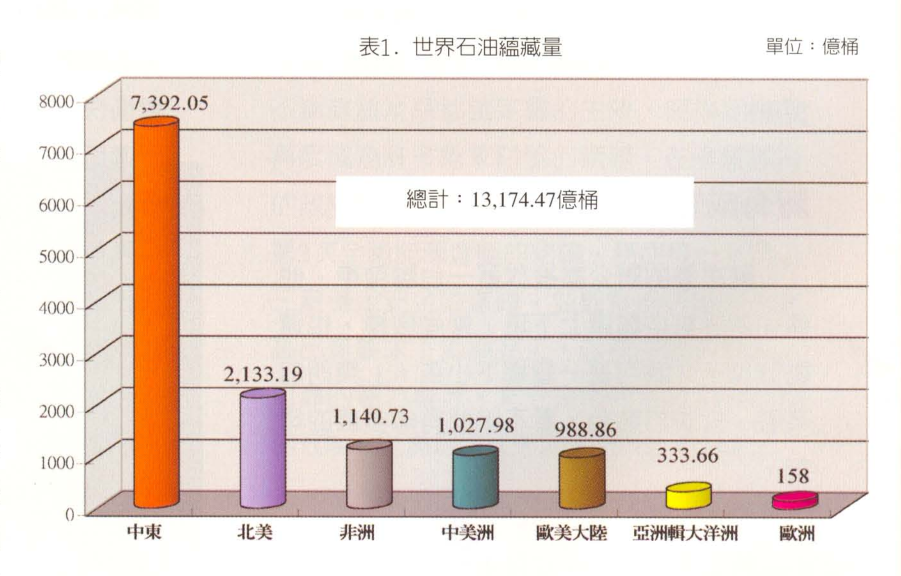


表2. 開發成本130美元/公斤以下的鈾礦蘊藏量

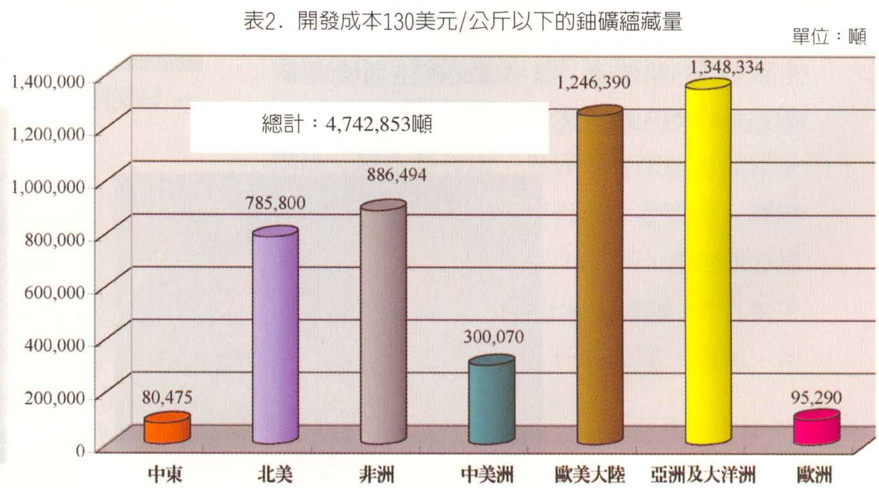




表3．石油與鈾發電的比較

	鈾	石油
產生相同能量所需的原料	1公克	2,000公升
國際價格	0.25美元	817.6美元

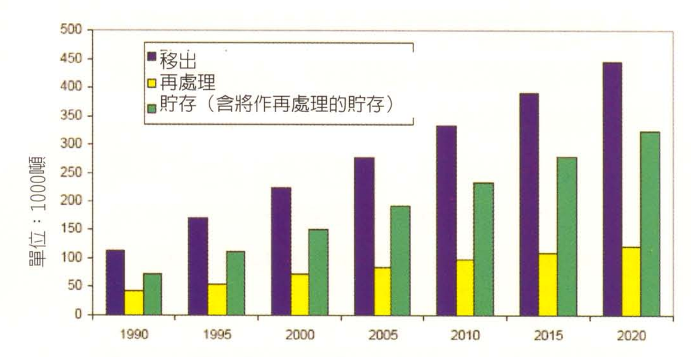


圖2．歷年及預測未來用過核子燃料移出、再處理及貯存量

2為全世界自1990年開始，用過核子燃料產生、再處理及貯存的量，並包含至2020年的預估。預測到2020年，用過核子燃料量將達到445,000噸，而其中的324,000噸還是未採再循環，而是貯存。

各國對於用過核子燃料有兩種截然不同的管理策略。其一為再處理—從中提煉出可用的物質(鈾和鈽)作為新燃料。另一種則是將用過核子燃料視為廢棄物、暫存等待最終處置。今日法國、日本及俄羅斯將大部分的用過核子燃料做再處理，而加拿大、芬蘭、瑞典和美國目前仍偏好直接處置，但美國在2006年提出全球核能夥伴計畫倡導再處理。雖然採再處理的國家不多，但仍有許多國家有相關再處理的研究設施。

目前每年商用用過核子燃料再處理廠的容量約為5,000噸。截至目前為止，已有9萬噸來自商用反應器的用過核子燃料，經過再處理回收鈾及鈽。

日本六個所村興建中的新商用再處理廠將可增加800噸的容量。其鈾試運轉於2004年開始啓動，預計2007年可正式商轉。[5]

過去50年來再處理用過核子燃料的主要原因，是要回收用過燃料中未使用的鈾和鈽，然後封閉燃料循環。另一個原因是減少

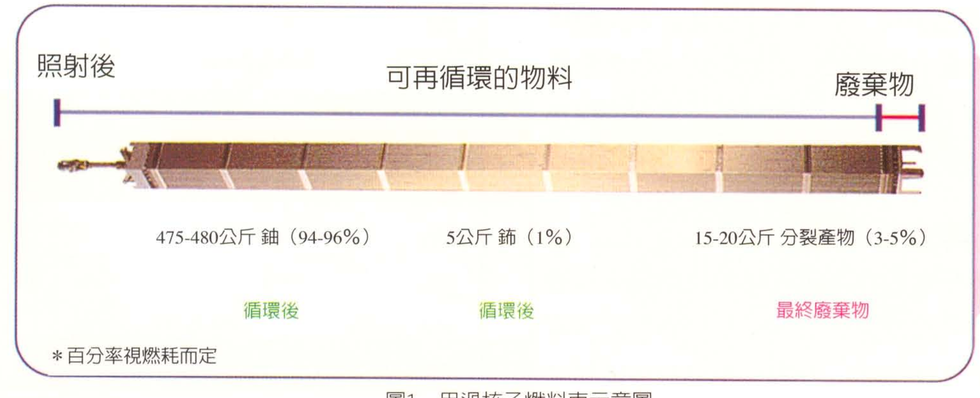


圖1．用過核子燃料束示意圖

要當作高放射性廢棄物處置的物質的數量。在許多歐洲國家、俄羅斯及日本，再處理一向都是國家政策。

在過去10年來，各界對於將放射性核種個別分離、以降低剩餘廢棄物的長期放射性以及用核分裂方式將長半化核種轉變為短半化期核種的興趣漸增。2005年時，出自對於長遠資源利用及防止核武擴散的關切，各界對於更全面的封閉式燃料循環的討論更加熱烈。

再處理技術

所有的商用再處理廠，都使用PUREX (鈽鈾萃取法) 再處理技術。用過核子燃料從核能電廠運送到再處理工廠後，燃料元件和燃料棒會被切成碎片，再以濃縮硝酸溶解，萃取分離分裂產物中鈾、鈽、高放射性廢棄物和其他各種廢棄物。

目前更為複雜的再處理技術，如UREX+ (能分離用過燃料中的鈽及其他長半化期超鈾元素)還在發展中，而會留下少許回收的鈾與送去混合氧化物(MOX)工廠的鈽。也就是在法國研發、所謂可以同時分離並處理鈾與鈽的COEX法。[4]

日本的再處理現況

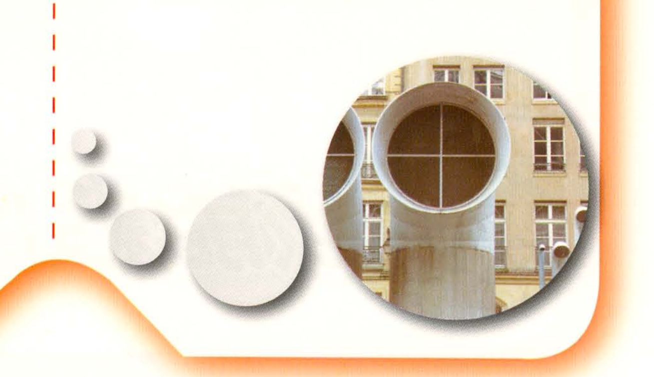
日本在茨城縣東海村設有再處理的先導廠研究開發設施，1977年後至2006年的30年中，實驗處理了約1,116噸的用過核子燃料。多年來的經驗都將應用在可望於2007年商轉的六個所村商用再處理工廠。

六個所村再處理工廠在1985年取得地方人士的同意，經過政府的安全審查後，於1993年4月起動工，從2001年陸續經過通水、化學，及使用鈾等各項試驗，在2007年3月進入活性試俥階段。從獲得當地居民同意至今，前後費時20多年。[6]

2007年2月初，法國拉阿格(La Hague)再處理廠送交日本先前委託處理的最後一批、130個玻璃固化高放射性廢棄物密封鋼桶。日本10個電廠送交的用過核子燃料原本多達

表4. 世界各國再處理廠現況

國家	營運中			關閉	建造中	除役	待命	其他	總計
	商用	實驗室	先導廠						
阿根廷								1	1
比利時						1			1
巴西				1					1
中國大陸					1				1
南韓							1		1
法國	2			2		7			11
德國						3		1	4
印度			1						1
義大利				2		1	1		4
日本			1		1	1			3
挪威						1			1
俄羅斯	1		1					1	3
英國	2					9	1		12
美國		1		2		6		1	10
總計	5	1	3	7	2	29	3	4	54



2,940噸，自1995年起，經法國再處理後減量為約700噸。[7]由於六個所村商用再處理廠營運在即，日本接回最後一批再處理後的用過核子燃料之後，等於正式宣告日本在國內自行再處理用過核子燃料的時代來臨。

再處理工廠對能源資源小國的日本而言，是為了有效利用鈾資源極為重要的設施，同時也是有效率地管理放射性物質不可或缺的一環。日本政府於2月底就基本能源政策修正展開最終版本的討論，再度確立未來數十年都將致力於核子燃料再循環的政策不變。[8]

法國的再處理

法國自開始核能計畫以來，便也同步研發再處理-再循環科技。此政策基調也隨著1991年底通過的核子廢棄物法案底定。目前法國國內用過核子燃料都會經過再處理，截至2002年底，法國總共再處理了18,000餘噸的輕水式反應器用過核子燃料、18,000餘噸的氣冷式反應器用過核子燃料。法國除了再處理本國的燃料之外，也為其他國家提供服務。[9]

表5. 世界商用再處理廠

國家	廠名	年處理量(噸)
法國	拉阿格(La Hague)-UP2-800	2,000
	拉阿格(La Hague)-UP3	
俄羅斯	梅亞克(Mayak)-RT-1(Ozersk)	400
英國	鎂諾克斯(Magnox)-B205	2,400
	洛普(Thorp)	
總計		4,800

資料來源：

註1:“Short-term energy outlook", (2007.04) EIA, p.17,http://www.eia.doe.gov/emeu/steo/pub/contents.html

註2:http://www.wise-uranium.org/umaps.html

註3:http://www.oecdobserver.org/news/fullstory.php/aid/2076/

註4:“Processing of used nuclear fuel for recycle,”UIC nuclear issues briefing paper# 72,(2007.3) http://www.uic.com.au/nip72.htm

註5:“Nuclear Technology Review 2006,”(2006.8) IAEA,p.15,16,57,http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/Pess/assets/ntr2006.pdf

註6:謝牧謙譯，“六個所村再處理工廠開始活性試俥”，原子力產業新聞，No.2326，2006.4.6

註7:http://www.world-nuclear-news.org/wasteRecycling/130207-Last_shipment_of_vitrified_high-level_wastes_leaves_for_Japan.shtml

註8:http://www.world-nuclear-news.org/nuclearPolicies/200207Policy_draft_backs_nuclear.shtml

註9:M.Giroux,"Status of spent fuel reprocessing in France",Status and trends in spent fuel reprocessing,IAEA 2005,p.59，http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1467_web.pdf

表1:http://www.eia.doe.gov/emeu/international/reserves.html

表2:http://www.wise-uranium.org/umaps.html

表3:國際原油價格 2007/5/2

http://www.moeaboe.gov.tw/oil102/dayoil.asp

國際鈾礦價格 2007/4/30 http://www.uxc.com/uxc_uranium-prices.html

表4、5:IAEA Integrated Nuclear Fuel Cycle Information Systems,

http://www-nfcis.iaea.org/

圖1:Areva公司提供

圖2:"Nuclear Technology Review 2006",(2006.8) IAEA,p.57,http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/Pess/assets/ntr2006.pdf

全球核能夥伴計畫中的再處理



◆ 編輯室

美國於2006年2月提出「全球核能夥伴計畫」(GNEP)，希望藉由全球各國的合作，減少對化石燃料的依賴，並且對於全球暖化做出貢獻。計畫的7項實施策略如下：

1 美國將採用新一代核能電廠
2 強化防止核武擴散、產生更多能源及較少廢棄物的再循環技術
3 美國將積極管理國內用過核子燃料，包括雅卡山永久處置場
4 可再循環用過核子燃料的進步型燃燒室反應器
5 在限制核武擴散風險的同時，也可使各國取得成本低廉的核電的燃料服務計畫
6 針對發展中國家的需求設計的小型反應器
7 強化核子保防措施，嚴防核武擴散[1]

美國為何重拾再處理

GNEP計畫最引人注意的是，美國的用過核子燃料政策，從以往的一次性燃料循環(核能電廠→處置)，轉變到使用新技術將用過核子燃料做再循環。雖然美國以前曾有民用再處理廠，但由於1977年政策轉變，所有民用再處理因防止核武擴散政策而終止，也因此目前美國並沒有任何營運中的民用廠。但事實上，自1940年代迄今，美國在再處理方面已經有250年的廠齡經驗，大部分經驗來自於軍用廠。[2]

美國當年決定停止民用核子燃料再循環的主要原因，是要防止國際間的民用再處理。政策是基於以下兩點的假設前提—第1，在核子循環中，再處理「應該」是核武擴散

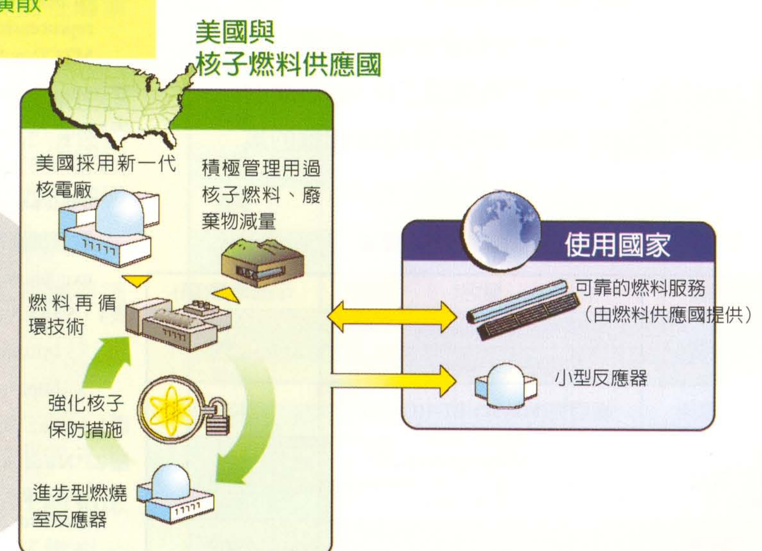


圖1. GNEP計畫7項實施策略



最大的風險來源。第2，美國在全球的領導地位，「應該」可以影響各國核子循環的作法。

然而，這兩點都引來不少疑問。

首先，以今日的科技而言，跟再處理相比，離心鈾濃縮科技的進步和普及，反而是核武擴散的一大隱憂(如伊朗引發世界關注的鈾濃縮計畫)。另外，美國「並沒有」成功阻止國際再處理民用核子燃料。雖然自1977年後，沒有任何國家新增其他再處理計畫，但是法國、英國、俄羅斯和日本原有的再處理計畫規模卻日漸擴大。因此，在他國再處理技術突飛猛進之際，美國的燃料循環研發能力，卻因政策而自廢武功，使得美國在延續國際領導地位方面，面臨了很大的挑戰。

30年後的今日，各界很清楚，國際防止核武擴散的制度，可藉由降低那些擁有較小型的核子方案，以發展鈾濃縮或用過核子燃料再處理能力的國家的動機來改善。假設燃料供應服務穩定的話，對於核子計畫規模較小的國家而言，相較於自行引進大型設施研發，向國外尋求燃料供應服務，顯得經濟得多。美國和其他有大型核子計畫的國家，可藉由保證燃料循環服務的可靠和經濟度，做到這一點。[3]

GNEP如何再處理

用過核子燃料含有鈾、超鈾元素(鈽和其他長半化期放射性物質)及核分裂產物。核分裂產物為廢棄物，並只占用過核子燃料約5%。分裂產物的累積會抑制核分裂反應，所以用過核子燃料一定要從反應器移出。

在全球核能夥伴計畫架構下，用過核子燃料再循環會使用如下述的UREX+技術:

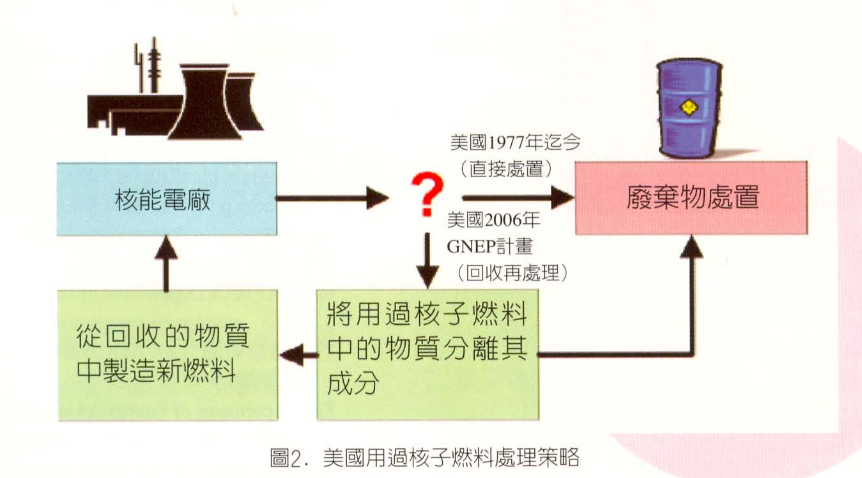


圖2. 美國用過核子燃料處理策略

■從用過核子燃料分離出鈾至很高的純度，為了再濃縮，使鈾再循環，貯存在未加屏蔽的設施或當成低放射性廢棄物掩埋。

■分離出長半化期核分裂產物、鎝和碘，並加以固化，於雅卡山進行處置。

■提煉短半化期核分裂產物、銫及鍶，做衰變貯存的準備，直到它們達到可作為低放射性廢棄物處置的標準。

■從剩餘的核分裂產物分離出超鈾元素(鈽、鋂、鋦和鍋)，用以製造進步型燃燒室(快中子)反應器的燃料。[4]



圖3. 自用過核子燃料回收的高純度氧化鈾產物

GNEP現況

2007年1月初，美國能源部宣布啟動「全球核能夥伴」的新策略計畫。新計畫將評估3種設施：(1)再處理與燃料製造廠的燃料再循環中心；(2)進步型再循環反應器－燃燒以鋼系元素為主的燃料，並轉換超鈾元素的快中子反應器；(3)先進核子燃料再循環研究設施。[5]能源部並於1月底公布，將撥出1千萬美金的獎助金作為再循環設施設址的進一步研究。11個已於2006年11月通過初步審核的場址，將會在今年5月底前送交設址研究報告給能源部。[6]

另外，美國和日本也已同意展開以「全球核能夥伴計畫」及新建核能電廠為中心，為期3 個月的核能合作計畫。[5]

資料來源：

圖1及註1:“The Global Nuclear Energy Partnership (GNEP)”,U.S.Department of Energy http://www.energy.gov/media/GNEP/06-GA50035b.pdf

註2:“Processing of used nuclear fuel for recycle”,(2007.3)UIC nuclear issues briefing paper#72,http://www.uic.com.au/nip72.htm

圖2:“What is a nuclear fuel cycle?”,U.S.Department of Energy,http://www.gnep.energy.gov/pdfs/factSheetPrimerFuelCycles.pdf

註3:“Report to congress: spent nuclear fuel recycling program plan”,(2006.5)U.S.Department of Energy,p.9,11, http://www.gnep.energy.gov/pdfs/snfRecyclingProgramPlanMay2006.pdf

註4、圖3:“Integrated spent fuel recycling capability,” U.S.Department of Energy http://www.gnep.energy.gov/pdfs/06-GA50506-04.pdf

註5:“核能新聞”,(2007.4)105期核能簡訊，財團法人核能資訊中心。

註6:Department of Energy Awards Over $10 Million for GNEP Siting Grants,http://www.gnep.energy.gov/gnepPRs/gnepPR013007.html

德國最終處置場纏訟多年終於放行

德國第一座中、低放射性廢棄物最終處置場，在聯邦行政法庭審理終結之後，終於敲板定案，結束了多年來因合法性的爭議所造成的延宕。

◆編輯室

康拉德最終處置場命運多舛

康拉德（Conrad）場址的前身是下薩克森州（Lower Saxony）的鐵礦礦脈，用來作為最終處置場。這是州政府環境部門在2002年第一個批准的申請案，儘管這個申請程序已經持續進行了將近20年。地方民眾與農夫們提出訴訟來抵制核發執照的決定，而那些訴訟都在2006年3月時遭到駁回，且無上訴權，但是地方民眾仍就法院無上訴權這項裁定陸陸續續提出訴訟。最後，在4月3日，耗盡了所有的法律程序之後，終於判決核定康拉德礦脈得以轉型成最終處置場。

康拉德場址將可容納303,000立方公尺的廢棄物，占德國核能工業低放射性廢棄物總量的95%，而這些廢棄物的放射性物質含量只有1%。康拉德場址將於2010年開始運轉。這些中、低放射性廢棄物包括過濾器、工具、化學性廢水、沉澱物/懸浮液、清潔用的材料、受放射性污染的金屬或非金屬等。這些廢棄物在裝入鋼桶進行最終處置之前，會先經過減容的處理，以減少廢棄物的數量。

下薩克森州的環境部長亨瑞奇•桑德（Heinrich Sander）對法庭的裁決表示歡迎，他說：「這是一個明確且清晰的法律結果。」然而，聯邦環保部長希格瑪•加百列（Sigmar Gabriel）表示，這個裁定並不足以影響德國現有其他有關放射性廢棄物的冗長辯論--在高雷本（Gorleben）設置高放射性廢棄物最終處置場的計畫。[1]



已經關閉的康拉德鐵礦地上建築物

康拉德鐵礦的歷史

康拉德鐵礦形成於1億5千萬年前，1933年時，在探勘石油的情形下偶然的被發現。1937-1943年間以鑽孔的方式開始鑽探調查這座鐵礦的礦床，最後在1957-1962年間完成1號礦井與2號礦井。地下礦脈的開鑿雖然已經在1960年展開，但是直到1965年才開始大規模

的開採。康拉德鐵礦總共開採出超過670萬噸鐵礦，只占總蘊藏量0.5%而已。

1976-1982年間，完成地質鑽探、地震調查與地質技術研究的分析等探勘工作，結果顯示出在鐵礦之上覆蓋有至少1,000公尺又厚又深的黏土層與泥灰層，足以密封、隔離地下水。這個鐵礦提供低放射性廢棄物最終處置絕佳的地理條件。

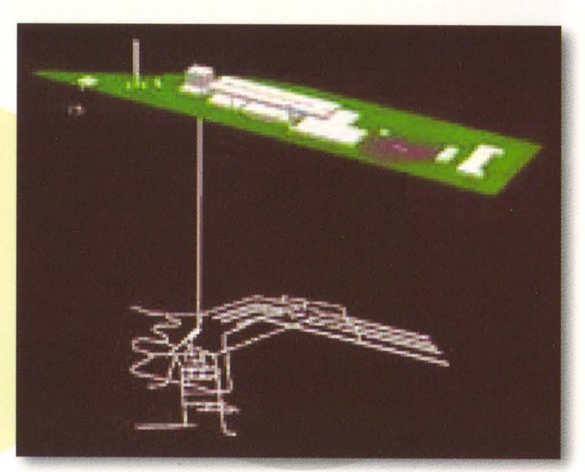
自德國行政法設立以來，康拉德場址經歷了有史以來最冗長的公聽會程序。1992年9月25日至1993年3月6日期間，在發照主管機關—下薩克森州環境部的指導之下，所有受到質疑的議題都被提出來討論。直到1998年，下薩克森州環境部精心製作了一份接近完成的場址計畫與核照草案。經過將近20年的時間，這份轉型計畫終於在2002年5月22日獲得批准。

處置計畫概述

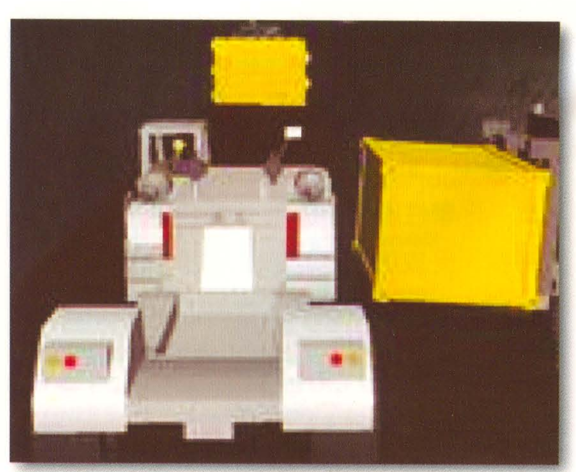
康拉德鐵礦原本的擁有者是薩爾茨基特（Salzgitter AG）集團（譯註：該集團為德國第二大鋼鐵製造商），位於下薩克森州的薩爾茨基特市。康拉德1號、2號礦井之間相距1.5公里，它們的地面基礎建設就是礦井的入口，而礦井總共有6層，水平延伸大約1.7×3公里。

1號礦井是用來吊送被鑿下的岩塊、補給品和人員，同時也是礦中超過50輛車輛與人員所需空氣的通風口。廢氣則經由2號礦井的地面裝置排出。

這座鐵礦是在1976年因為經濟因素而關廠，由於擁有良好的礦脈地質條件，因此



康拉德最終處置場示意圖



護箱運輸示意圖



進行一項大規模的地質科學探測調查計畫，以評估康拉德是否適合做為極低熱度放射性廢棄物的最終處置場址。1982年，聯邦物理與度量衡學會（Federal Institute of Physics and Metrology, PTB）—輻射防護聯邦辦公室（Federal Office for Radiation Protection, BfS）的前身，開始進行康拉德最終處置場址的發照程序（場址計畫許可）。

從1992年開始，DBE（German Company for the Construction and Operation of Waste Repositories）—德國廢棄物最終處置場建造營運公司代替聯邦政府接下進一步的鑽探工作。2002年6月，將康拉德鐵礦轉型成極低熱度放射性廢棄物的最終處置場的計畫獲得同意，因為不斷有反對這項決定的抗議聲浪，以致於轉型所需的相關工作便無法展開。2006年3月，盧內堡（Lüneburg）最高行政法院將所有抗議發照決定、懸而未決的訴訟全部予以駁回。

進一步的上訴並未獲得許可，後續對聯邦行政法院的抗告也在2007年4月3日被駁回。至此，康拉德鐵礦轉型成最終處置場場址的法律程序已完全終結，成為無庸置疑的「已決事件」。

最終處置場的目標

康拉德鐵礦轉型成最終處置場，將接收固體或壓縮之後的極低熱度放射性廢棄物。處置場是由2號礦井全新的地面系統與礦井起重設備構成，用以運送放射性廢棄物進入礦道中，而吊送人員與補給品的起重設備是分開的。為了保護1號礦井重要的歷史性意義，系統將維持現況不變。計畫中地下部分的工作包括處置室、道路和一些基礎建設的開鑿以及設備，這些開鑿工作大約要耗掉4-6年的時間。



公眾討論會



控制室儀表板

康拉德最終處置場的概念是，在地下800公尺與1300公尺之間有數個處置區，容量大約65萬立方公尺，而執照上的實際處置容量約30萬3千立方公尺。德國大約90%的放射性廢棄物將在此進行合格的最終處置。為了貯存以及回填剩餘空間所需的技術已經發展完成，由DBE建造出原型並且測試。轉型成最終處置場作業目前已經準備好，將進行大規模的工作。

處置場營運現況

直到最高法院判決場址計畫定讞、執照已經確定之時，康拉德礦區營運的重點在於維持安全的狀態。要求必須維護建築物、地面上與地面下的機器與車輛，以及地面下的礦道結構。

地面下的礦道結構在深度800公尺與1,300公尺之間，範圍1.7×3公尺，共有6層，還有一個100萬立方公尺、40公里長的空間供重型機具維修時移動所需。總計會有超過50輛的車輛在地面下工作。

現在，康拉德場址已經開放供人參觀。參觀者在更換衣服、聽完自動救生系統的使用解說之後，就可以進入地下3層、深度1,000公尺的地方參觀。乘坐礦車，參觀者可以遊歷40公里長、垂直變動達500公尺的坑道。就像坐雲霄飛車一般，在狹窄的礦坑中，行車的噪音不斷從石壁上反彈回來，加上這個未知的、棕色礦石所組成的地下世界，看似令人摒息的高速，其實只是一種錯覺，實際時速只有35公里而已。到此一遊實在讓人印象深刻！DBE的網站[2]中也有康拉德場址的虛擬導覽，供全世界的民眾到此神遊。

參考資料：
註1：http://www.world-nuclear-news.org/wasteRecycling/120407German_waste_site_go-ahead_incontestable.shtml
註2：http://www.dbe.de/en/sites/konrad/1/index.php
註3：本文圖片來源同註2

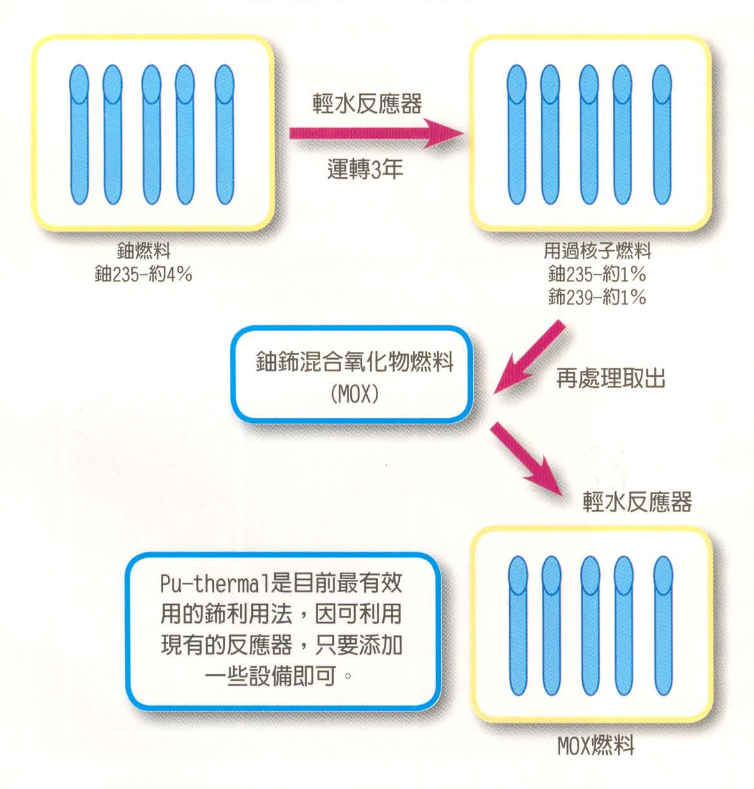


鈽熱中子是目前最有效用的再循環法

所謂「Pu-thermal」是組合的日製英語，係取自鈽（Plutonium）的化學符號「Pu」和熱中子反應器（Thermal）的「Thermal」而成。

◆葉有財 譯

目前，日本所運轉的輕水反應器（熱中子反應器的一種），係使用鈾235做為核子燃料。被輕水減速下來的熱中子和鈾235反應時，會產生大量的能量以供利用，此乃目前的輕水反應器原理。至於Pu-thermal的輕水反應器，即採用鈾和鈽混合而成的「混合氧化物燃料」（Mixed Oxide Fuel），簡稱為MOX燃料。在鈽的同位素中，其質量數有238、239、240、241、242等。其中的鈽239與鈽241會起核分裂的反應而放出能量。



鈽239，特別在用過的核子燃料中會蓄積起來，如一般的鈾燃料在燃燒3年之後，原本占全鈾中4%的鈾235（96%為鈾238）會剩下約1%，同時會產生1%的鈽239。若將此用過核子燃料，經過再處理的程序，即可取出其中的鈽239再加以利用（註）。

因鈽239對熱中子的吸收截面約比鈾大3倍，用於控制能量輸出相關的遲延中子（delayed neutron）的比率較少等特性，配合現有的核子反應器，稍加以變更，即可使核子反應器特性幾乎與使用鈾燃料時相等。

但是由於鈽會釋放阿伐射線，在燃料的使用上須要特別小心。日本計畫使用Pu-thermal反應器時，先將反應器核心部分的1/3，採用鈽的混合燃料，即1/3 MOX反應器的運轉，之後再改進為反應器核心全部使用MOX的運轉。

註：為了禁止鈽239被使用於核子武器，故規定以混合氧化物燃料（MOX）的狀態取出。

參考資料：「原子力」，P.144-P.145,竹田敏一著，株式會社ナツメ社，2003年6月30日，東京

（本文譯者為中華民國核能學會秘書長）

原子能機構 放射線醫療應用的研發近況

◆葉有財 譯

日本原子能研究開發機構(JAEA)的研究反應器JRR-4，在治癌方面的研究，即使用硼的中子捕獲療法(BNCT)的臨床件數，以惡性腦腫瘤為主，已達50件之多。最近，大阪醫科大學與2006年5月成立的東海村醫院合作，準備重新進行BNCT的臨床研究。由於地區性醫院的合作，可期待BNCT治療效果的提升，並可將研究目標自腦腫瘤擴大到適用於難治的癌症方面。

發生在中樞神經的浸潤性腫瘤，在切除腫瘤之後，仍有很高的機率從殘留的浸潤性腫瘤細胞再復發的可能。若要將腫瘤的周邊一併摘除時，因會有障礙發生，故僅靠手術的治療法是很困難的。

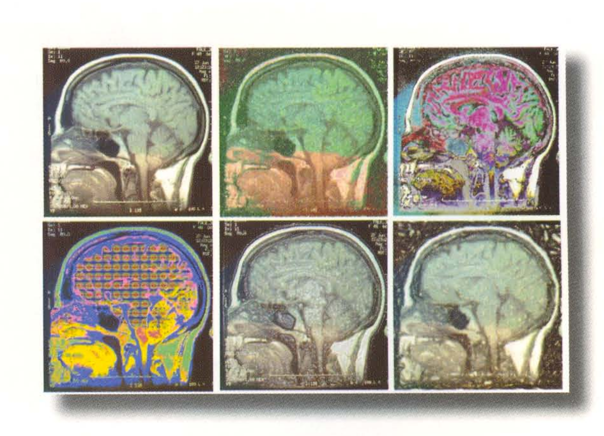
因此，「浸潤腫瘤細胞內若會產生放射性，而且僅留在原處」，在這種構想之下，科學家乃利用硼-10，與熱中子起反應之後，會產生α粒子與鋰(Li)原子核的兩種粒子，其行徑距離又極短的性質，首先對病人投入會選擇性聚集在癌細胞的含硼-10化合物，然後針對病灶用中子照射，即所產生的α粒子與鋰原子核，會在細胞組織內消耗其能量，而且因行徑距離幾乎等於細胞的大小，故不會傷害到周邊的正常細胞，僅能破壞癌細胞。以上是有關BNCT的原理。

由於照射技術精確度的技術提昇，最近不僅是頭頸部，亦可應用在肺部的癌症照射。

JRR-4的BNCT應用，是在1999年由筑波大學的醫療團隊開始的。現在能夠使用在臨床研究的核子反應器乃僅有JRR-4而已。在實際的治療上尚須配合劑量的模擬、硼藥劑的點滴、採血的硼濃度確定等手續。

這次由於原子能機構與地區醫院間的合作，對於BNCT照射臨床的癌細胞位置等，已有正確把握的可能，再透過深一層的臨床研究發展，相信對於建立優良的治癌療法，定必有所貢獻。

取材自原子力產業新聞 No.2343，2006年8月10日
(本文譯者為中華民國核能學會秘書長)



核能接受度擴大

◆翁雅慧 譯

核能在歐洲、北美、日本及澳洲受到普遍的支持，風潮比擁核者原先的預期要來得快。

廣義來說，核能重新吸引民眾注意的原因為以下3點：改善的發電成本可對抗一再飛漲的電價、化石燃料預期未來將有諸多排碳限制、以及民眾對能源安全性的關注達到自1970年代以來，大眾開始意識到地緣政治因素影響力的最高峰。以上3點因素在歐洲與北美民眾對核能的支持度中，扮演著重要角色，而澳洲光是對於碳釋出物的考量，便吸引民眾選擇核能。

動見觀瞻的環保人士扮演的公眾角色，也在擴大核能支持度上有所助益。提出蓋亞假說的洛夫洛克表示，核能即使不是理想的能源，仍有存在的必要，此觀點得到許多人的支持。洛夫洛克一向支持核能，他近年來更是大聲呼籲擁核。而身為「綠色和平組織」創始人之一的摩爾，在深入了解地球可能遭遇全球暖化的威脅，以及深思民間反核是否具有實質意義後，改變了其原先反核的觀點。不過對於某些環保團體而言，他們募款的來源乃建立在民眾對核能的恐懼心理之上，因此便無法如上述人士一般可以暢所欲言。

當世界自然基金會澳洲分部執行長柏恩公開支持核能，並對開採鈾礦給予正面評價時，情勢便呈現了明顯變化。隨後柏恩即著手進行世界自然基金會的國際能源使命，以達到該組織降低溫室氣體釋出物的目標。然而柏恩立場的轉變，不免招致了其環保夥伴們的嘲弄。荒野保護協會的瑪爾挖苦了柏恩一番並表示，「無論何時何地，開採鈾礦都是不道德的行為，所有環保團體都應阻止任一環節的核燃料循環發生！」瑪爾並呼籲柏恩乾脆回到他前公司—英國石油公司的懷抱算了。柏恩數年前在英國石油任職，其理性的建議不被公司接受。一項稍後發布的新聞則說「澳洲環保運動的核心，在於反對所有型態的核能工業」。不過「綠色和平組織」前執行長吉爾丁，則為柏恩辯駁。他也觀察到柏恩身處險境，因為「核能議題是近似宗教的高度意識形態」。而世界自然基金會稍後重申，「核能發電並非全球暖化的解決之道。」

在美國，「綠色和平組織」創始人摩爾與前環保署長惠特曼共同發起了「潔淨安全能源聯盟(Clean and Safe Energy Coalition, CASEnergy)」，聯盟擁有超過50名涵蓋產業公會、電力公司、工會與大學的分會會員。該聯盟主張核能是安全、可靠並且節省成本的能源，在環境保護方面可符合美國對能源的要求，並可提供電力選擇的多樣化，因此擁護核能。最近的民調顯示，民眾普遍存在



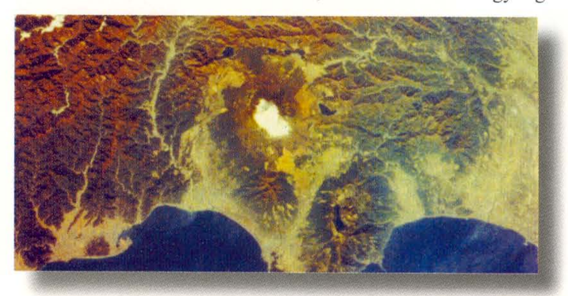
對核能的誤解。因此在美國核能協會的資助下，潔淨安全能源聯盟的主要任務為在各州與地方，教育民眾正確的核能相關資訊。舉例來說，很多美國人並不知道核能發電所釋出的溫室氣體量微乎其微（60%的歐洲民眾認為核能會釋出巨量的溫室氣體）。

另外一項改變民眾對於核能看法的因素，則是核能的安全性。車諾比爾核災20周年凸顯了安全性議題，並提醒民眾，為何在蘇聯境外從未核准使用發生災變的反應器設計。同時民眾也漸漸瞭解到即使是出現重大意外，或是遭遇恐怖分子攻擊時，西方的反應器設計也不致於引起任何釋出大量輻射的災難。目前各國對於反應器爐心熔毀已具有足夠的經驗－最有名的是1979年的三哩島意外事故－即使發生嚴重的意外，各國政府都有信心可以確保周圍環境以及鄰國的安全。核子反應器其實比其他某些工業主要的基礎設施還要安全。

根據調查，日本有75%的民眾滿意核能發電現況，或甚至樂於見到未來核能有更進一步的發展；而只有36%的民眾明白核能是防止全球暖化的方法，31%的民眾則察覺到鈾的供應較石油穩定。

在澳洲，並無工業遊說團體促銷當地使用核能發電，而媒體一系列的故事和特別報導，則已經扭轉了以往對核能的負面評價。澳洲總理與其他高級行政首長也發出正面支持之聲。然而，新聞工作者在核能議題上則是採取更為審慎的態度，並且拒絕政府對於棘手的廢棄物、輻射與安全問題以草率的法令矇混過關。這是首次核能發電的缺點與倡導高水準生活工業社會的其他面向及風險，被放在同一個天平上做良好的檢視。新南威爾斯省的前勞動部長卡爾重申，「沒有核能便無法降低碳釋出物」，以及核能必定是解決氣候變化的要角。

Atoms in Japan 11/3/06, Australian 4 & 9/5/06, Daily Telegraph 5/5/06, WWF 4/5/06, Wilderness Soc 8/5/06, NEI Overview 24/4/06, www.cleansafeenergy.org



核能新聞



美國核能投資擴大 核電發電成本再降

美國核能投資規模日漸龐大，10餘家公司與聯合企業摩拳擦掌，準備為高達33部新核子反應器提出申請建廠-營運執照。美國核能協會表示，在2007年底前，核能工業界將至少投資20億美元，用於新式反應器的設計與工程作業、申請許可證準備，與如反應器槽及蒸汽產生器等長交貨期設備的取得。雖然短期內不會執行所有提案，但新機組總容量高達約4,000萬瓩電，而資金部分將是最主要的挑戰。

2006年美國31州共103座核能電廠，以每度電成本1.66美分的歷史新低紀錄，總計發電7,876億度。核能工業界透過更新反應器執照，穩定累積資產價值。截至目前為止，已有48件換照案通過審查，使原來運轉期為40年的核能電廠再延壽20年。NEI 20 & 22/2/07.

美國核發早期廠址許可證 簡化新建電廠程序里程碑

經過長達3年5個月的冗長的審查程序後，艾塞隆公司終於取得其位於伊利諾州柯林頓核能電廠的早期廠址許可證。核管會於1989年建立的早期廠址許可證制度，是申請新建核能電廠許可的簡化程序之一，可讓電力公司在未正式決定是否興建核能電廠前，先行實施環境及場址適性度評估。而艾塞隆公司是自此制度建立以來，第一個取得許可證的公司，在美國政府擴展核電史上，具有指標性的意義。[1]

獲得早期廠址執照、容量高達240萬瓩電的柯林頓新廠，並未特別指定使用何種技術。但安全、環境與相關地質評估都顯示該地相當適宜建廠。柯林頓電廠原本就有一部機齡20年、容量102.6萬瓩的沸水式反應器，預計在2007年內可取得更進一步的新廠早期廠址許可證。由於反應器機型有美國反應器設計認證，故電力公司之後還需要申請建廠-營運執照。艾塞隆將在今年內進行首次建廠-營運執照申請，處理程序預計為3年。

Platts 8/3/07. http://www.ens-newswire.com/ens/mar2007/2007-03-09-04.asp [1]

美國核能預算大躍進

美國核能管制委員會預計，2008年會計年度，用於評估新核能電廠計畫的工作費用，可望從2007年的1.33億美元增加至2.17億美元。預算將用於10餘件建廠-營運執照申請案。核管會總預算中約有90%的資金是來自工業界的貢獻。

能源部則爭取243億美元的預算，其中包括核能計畫的8.75億美元。為終止燃料循環並支持全球夥伴計畫而進行的先進燃料循環倡議(Advanced Fuel Cycle Initiative)，將獲得3.95億美元（2007年為1.675億美元），而第4代反應器計畫下的極高溫反應器研發則分配

到3,600萬美元。以盡早運用進步型反應器為目標的「核電2010」計畫預算，由2007年的8,000萬美元提升到1.14億美元。另外淨煤技術預算為3.85億美元、再生能源與能源效率12.4億美元、基礎核融合研究預算則為4.28億美元。

能源部的預算文件提及，美國直到2030年為止，每年需要建造800-1,200萬瓩的新發電容量，總量達到3.45億瓩。「核電2010」計畫在於使電力公司盡可能在2010會計年度以前，真的有蓋核能電廠的選擇權，以達增加發電容量的目的。核電2010計畫特別將開始進行奇異公司的經濟簡化型沸水式反應器、西屋AP1000型反應器的設計工作，以確認成本並採購長交期設備。

由於美國國內修讀核工系所的學生人數已經達到目標，可支撐預期的核能復興，因此能源部並無提出預算資助相關大學計畫。

DOE 5/2/07, Nucleonics Week 8/2 & 22/3/07.

瑞士新政策 仍肯定核能未來

瑞士政府宣布，應適時以新機組替換現有的5座核能反應器。瑞士的新能源政策主軸包括再生能源、發電效率以及燃氣火力電廠，而除了無擴充性的水力發電之外，核能仍持續成為主要的供電來源。瑞士政府預估，如果沒有每年新投資200億度電力，到了2020年電力供應將不足25%。瑞士於2003年舉行的公民投票，肯定了核能為國家未來的主要能源。WNN 22/2/07.

保加利亞反應器關閉 巴爾幹國家直呼吃不消

巴爾幹半島5國同聲要求歐盟，允許保加利亞重新啓動寇茲婁杜核能電廠3、4號反應器機組。保加利亞先前同意，在2006年底前關閉此2部前蘇聯設計的機組，以作為加入歐盟的條約之一。然而保加利亞、塞爾維亞、馬其頓、阿爾巴尼亞和克羅埃西亞等5國發表聯合聲明指出，他們「相當關切該區的現有電力供應問題，可能會導致政經情勢更不穩定」。在過去一年中，該區的電價已上漲了80-100%。但由於歐盟補償過保加利亞的停機損失，故不可能讓步。斯洛伐克和立陶宛也向歐盟執委會要求，在找到替代能源前，先讓他們重新啓動為加入歐盟而承諾關閉的前蘇聯時代反應器機組。

EUObserver 14/3/07.

中國大陸採用新型反應器

西屋-紹爾集團聯盟與中國大陸國家核電技術公司簽署了一份框架協議，針對山東省海陽與浙江省三門核能電廠，西屋-紹爾聯盟將提供4部第3代，11萬瓩級的AP1000 核能反應器機組。最終版本的合約將於2007年中期簽署，預計將於2009年動工，到2013年首座反應器將開始營運。

中國大陸另一核電公司「中廣核集團」



向來偏愛使用法國核能技術，集團在廣東省的第二核電基地陽江核能電廠，將建造2部165萬瓩級，法國亞瑞華的歐洲壓水式反應器。預計該集團很快就會與亞瑞華簽訂最後的合約，而與法國電力公司有關的協議也已在2月簽署。Westinghouse 1/3/07, IHT 5/3/07.

南非擴大對核能的依賴

南非政府宣布，將在西開普省建造採用壓水式反應器的核能電廠。第1座電廠發電容量約為100萬瓩，預計在2014年加入運轉行列。除此之外，南非政府亦計畫針對礫石床模組反應器建立濃縮容量。南非在傳統反應器、礫石床模組反應器以及燃料循環發展上，將會尋求國際核能供應商，如法國亞瑞華的參與協助。

對參與南非建造新反應器興趣濃厚的俄羅斯原子能機關，與南非Koeberg電廠簽約提供燃料至2008年，並且希望能延長至2020年。南非核能公司(Nuclear Energy Corporation of South Africa, Necsa)希望在2030年，12部新大型壓水式反應器機組和24部16.5萬瓩級的小型礫石床模組反應器加入發電陣容後，能使核能容量增加至約2,700萬瓩，供應全國30%的電力。

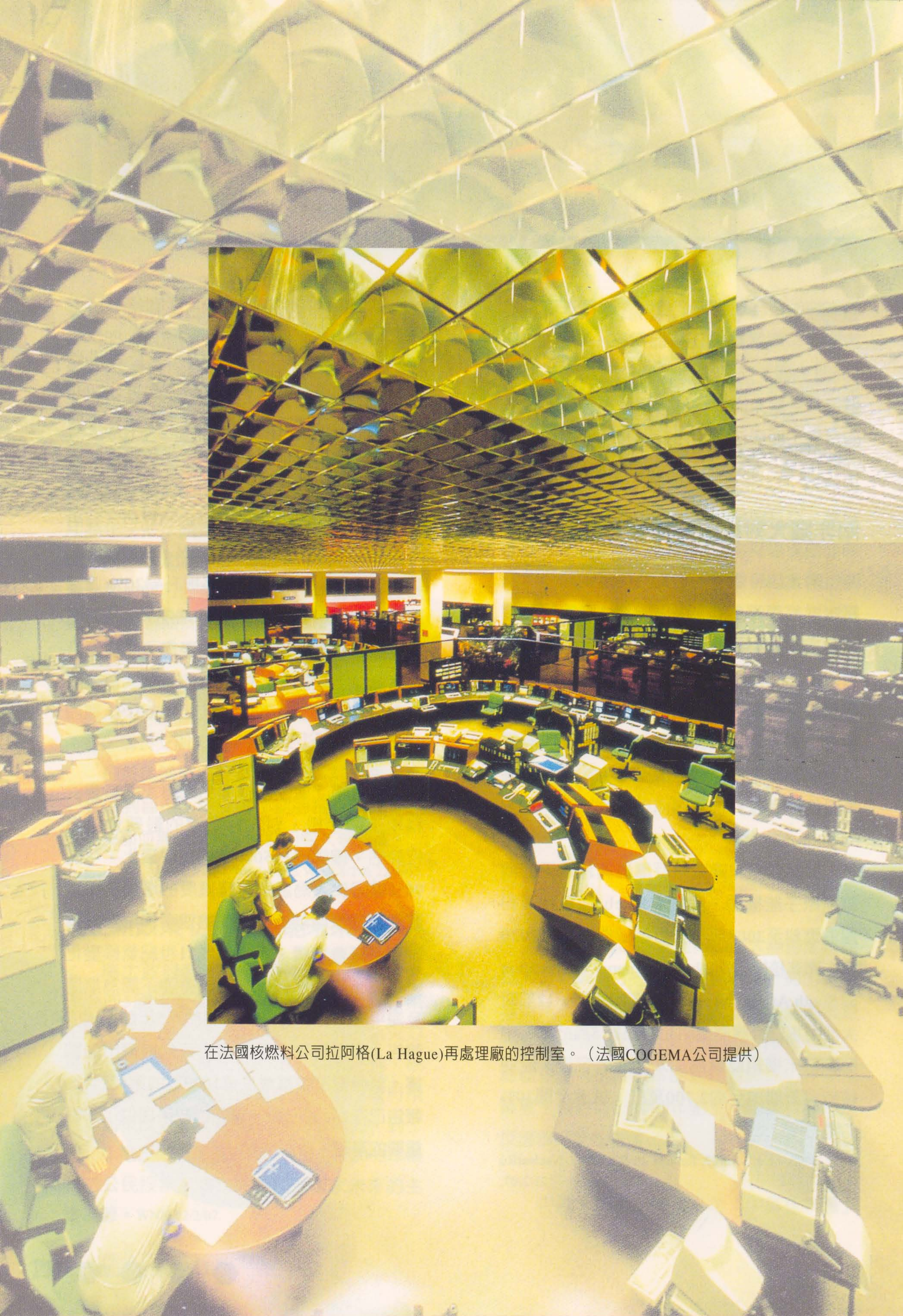
WNN 12 & 16/2/07, Reuters 20 & 22/2/07, NuclearRu 23/2/07.

澳洲能源排碳研究 評估核能發電

澳洲能源供應協會日前完成符合排碳限制的電力供應研究報告。研究模擬在2030年，電力負載增加67%的狀況下，以三種電力供應措施所能達到的2000年排碳水準的目標—所有可行的技術可達140%、核能以外的發電方式達100%，無核能與化石燃料（利用碳捕獲與儲存技術）僅達到70%。由於限制二氧化碳排放，核能供電量將提升到20%(澳洲現無核能電廠)，但總成本約增加30%。報告結論表示，澳洲未來發電需要盡可能運用各種可行的技術。ESAA 31/1/07.

全球暖化 科學家共識

聯合國「氣候變遷政府間專家委員會」科學工作小組，對氣候變遷的最新資訊進行評估，確認自1950年起的氣候暖化，可能90%導因於人為溫室氣體濃度的增加。如果溫室氣體以目前或是更大的速率釋出，暖化現象不僅會持續，還會造成21世紀氣候變化更劇烈。雖然氣候變遷委員會並不認為氣溫及海平面的上升幅度，會高於其5年前提出的報告，但是專家們更加肯定其先前提出的數據。氣候變遷委員會長達1600頁的第4次評估報告已在2月初出版，為各國政策提供了一個重要的基礎。IPCC 2/2/07.



在法國核燃料公司拉阿格(La Hague)再處理廠的控制室。（法國COGEMA公司提供）